第27卷　第6期　　腐蚀科学与防护技术　　Vol.27　No.6
2015年11月　　CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY　　Nov.　2015

西部某天然气田三通管件腐蚀失效分析

韩难难[1]　刘　斌[1]　张　涛[1,2]　王忠义[3]　孟国哲[1,2]　邵亚薇[1,2]

1. 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院腐蚀与防护实验室　哈尔滨　150001;
2. 中国科学院金属研究所　金属腐蚀与防护实验室　沈阳　110016;
3. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院　哈尔滨　150001

摘要:西部某天然气田集输管道一处直插式三通管件发生爆管事故,三通主管材质为16Mn钢,支管材质为316L+L416双金属复合管。通过观察失效三通形貌,测量失效三通壁厚,利用电化学方法研究16Mn钢和316L不锈钢在气田模拟环境中的电偶腐蚀行为,利用FLUENT软件分别对直插式、45°和30°三通内部流体的流动特性进行数值模拟计算,结合现场腐蚀情况调查,分析三通失效原因。结果表明,三通选材设计中存在电偶腐蚀的缺陷,且其直插式结构导致三通内部流体的流态发生剧烈变化。天然气在爆管位置形成涡流,气田产出水因低速涡流而逐渐粘附于管道内壁面,并与CO_2形成酸性腐蚀环境,导致管道发生电偶腐蚀。爆管处管壁所受壁面剪切力较大,流体对管道内壁形成冲刷作用。三通管件在电偶腐蚀和机械冲刷的协同作用下失效。

关键词:直插式三通　涡流　电偶腐蚀　机械冲刷

中图分类号:TG172　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002-6495(2015)06-0600-08

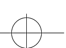
Corrosion Failure Analysis of a Tee in a Natural Gas Field

HAN Nannan[1], LIU Bin[1], ZHANG Tao[1,2], WANG Zhongyi[3], MENG Guozhe[1,2], SHAO Yawei[1,2]

1. Corrosion and Protection Laboratory, College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: Incident involving failure occurred for a 40 months old upright type tee of gas filed gathering and transmission pipeline in a west natural gas field. The tee consisted of a main pipe of 16Mn steel and branch pipes of bimetal composite of 316L stainless steel+L416 steel. Examinations were performed to identify the cause of the failure, which include visual physical inspection, pipe thickness measurement and acquiring the galvanic corrosion behavior of 16Mn steel and 316L stainless steel in an oxygen-free medium containing chloride ion concentration 150 g/L with CO_2 partial pressure 0.1 MPa at 65 ℃ using electrochemical methods, as well as Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of the tee with assumed angles as 90°, 45°and 30°respectively between the branch pipe and main pipe along the direction of inlet using the FLUENT software. Investigations revealed that for the present tee design, there existed galvanic couple of the metallic materials and the straight cutting structure of the tee caused the fluid changes radically. Gas field water gradually adhered to the inner side of the pipe due to the low velocity that caused by the vortex which

定稿日期:2014-11-21
作者简介:韩难难,女,1991年生,硕士生
通讯作者:张涛,E-mail:zhangtao@hrbeu.edu.cn,研究方向为腐蚀与防护
DOI:10.11903/1002.6495.2014.328



was formed nearby the pipe explosion site. Corrosion then ensued as CO_2 dissolved in the water. The area around the explosion site suffered from large wall shear stress caused by the fluid scouring action. Because of the synergy of galvanic corrosion and fluid flow erosion the pipe gradually thinned, and then perforated.

Key words: upright type tee, vortex, galvanic corrosion, fluid flow erosion

1 前言

我国西部地区地下蕴藏着丰富的天然气资源。在天然气开采过程中，数千米地下的CO_2等气体和地层水随着天然气一起被开采出来[1]。这些气体和地层水被气田的集气管线汇集，之后输送到处理站进行气水分离获得高纯度的天然气。输气管线的三通部件由于异种材料焊接及高温高压气体汇合等原因而成为管道的薄弱部件，较容易发生爆管事故。在输气管线内，高速流动的输送介质会对管道形成冲刷作用，输送介质流速的变化会改变介质的流动状态，从而对管道的腐蚀产生重要影响。

西部地区某气田所产出的天然气中含水率约为7.4%，CO_2分压约为0.1 MPa，地层水中氯离子浓度约为150 g/L，产出的介质具有较强的腐蚀性。为了防腐蚀，并综合考虑经济效益，三通支管材质选用316L不锈钢，主管材质选用16Mn钢。三通结构为直插式，即支管与主管沿入口方向成90°角连接。主管内径为422 mm，壁厚为26 mm，支管内径为144.3 mm。支管入口设计流速为5.3 m/s，介质温度为95 ℃，主管入口设计流速为5.6 m/s，介质温度为61 ℃。支管传输介质汇入主管后管道内传输介质流速为6.14 m/s，温度为65 ℃。但是在生产过程中集输管道的各个三通均发生了明显的局部减薄现象，部分位置的管道减薄速度达8 mm/a左右，投入使用40个月后甚至发生了爆管事故。

如此快速的局部减薄现象究竟是由于腐蚀还是流体冲刷的缘故，目前尚不清楚。因此在本次研究中，主要通过对失效三通管件的形貌观察及壁厚测量、模拟电化学实验和计算机模拟流态等方法，分析三通失效的原因。

2 实验方法

实验材料为取自西部某气田的失效三通，主管材质为16Mn钢，其化学成分 (质量分数，%) 为：C 0.144，Si 0.313，Mn 1.548，P 0.014，S 0.012，Ti 0.002，Nb 0.002，Al 0.028，V 0.005，余为Fe。支管材质为316L不锈钢，其化学成分 (质量分数，%) 为：C 0.020，Si 0.504，Mn 1.059，P 0.036，S＜0.001，Ni 11.90，Cr 17.19，Mo 2.093，余为Fe。

对失效三通进行宏观检查，并观察其宏观形貌。用线切割机从失效三通主管上截取30 mm×30 mm的方形试样，在扫描电镜上对其表面进行电子显微分析。采用螺旋测微器测量失效三通主管的壁厚，失效三通管件的三视图如图1所示，测量以A，B，C，D，E (靠近三通角焊缝) 为起点的线段AA′，BB′，CC′，DD′，EE′对应位置的管道壁厚，分析三通主管减薄规律。

将16Mn钢和316L不锈钢加工成尺寸为10 mm×10 mm (有效工作面积1.0 cm^2) 的电极，用环氧树脂封装，然后用水砂纸逐级磨至2000#。利用CST500电化学噪声及电偶腐蚀检测仪进行电偶腐蚀测试。实验采用三电极体系，两支工作电极分别为16Mn钢和316L不锈钢 (WE1和WE2)，参比电极为Ag/AgCl电极。分别测试两工作电极工作面正对相距0，10，20和30 cm时电偶腐蚀电流密度，数据采集频率为0.1 Hz，实验时长36 h。腐蚀介质模拟西部某气田地层水，配制247.18 g/L的NaCl作为电解质溶液。实验前用氮气除氧0.5 h，实验时电极体系及溶液温度由恒温水浴锅控制，并保持在65 ℃，并且始终通入0.1 MPa的CO_2。

用FLUENT软件模拟三通内部流场。根据三通管件特性，以三通支管为中心，以主管上、下游5 m长的管线为研究对象，利用Gambit建立直插式三通的物理模型。根据表1设置边界条件，并进行网格划分[2,3]，建立了356231个网格体积单元，如图2a所示。在计算过程中定义主管右管口及支管口为入口，主管左管口为出口。以主管与支管轴线交点为笛卡尔坐标原点；以主管轴线为X轴，主管下游为X轴负方向，上游为X轴正方向；以支管轴线为Y轴，支管中流体流动方向为Y轴正方向；将主管轴线以

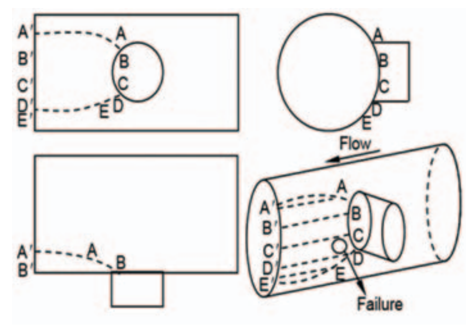


图1 三通管件的三视图

Fig.1 Three views of the tee joint

及支管轴线构成的面定义为XOY平面，即Z平面。在直插式三通物理模型的基础上，绕着笛卡尔坐标Z轴，分别将支管逆时针旋转45°和60°，创建支管与主管入口方向呈45°和30°的三通物理模型。根据表1设置边界条件，进行网格划分，分别如图2b和c所示。通过迭代计算输出不同结构的三通特定截面流体的速度云图、湍流强度云图、温度云图及壁面剪切力云图。

3 实验结果

3.1 现场观测结果

3.1.1 事故现场　事故现场如图3a所示。爆管位置位于主管下游且沿着三通角焊缝 (支管与主管连接处) 8点钟方向 (图3b)。靠近三通角焊缝7至11点钟方向的下游主管减薄明显，并且随着距离的增加，减薄的区域呈双曲线型逐渐扩大 (图3c)；支管未发生减薄；与支管口正对的主管虽有减薄但却并不严重 (图3d)。

3.1.2 失效三通的形貌　肉眼观察,位于双曲线型减薄区域内的管道腐蚀严重，并伴随有流体冲刷的特征，局部区域的形貌呈现鳞片状，区域边缘被

表1 模型的边界条件

Table 1 List of boundary conditions

Boundary type	Branch pipe	Main pipe
Velocity inlet	Gas inlet (5.6 m/s)	Gas inlet (5.3 m/s)
Outflow	---	Gas (6.14 m/s)
Wall	Pipe wall (adiabatic)	Pipe wall (adiabatic)

流体冲刷出明显的界线 (图4a)。与双曲线型减薄区对称的上游管道内壁发生明显的点蚀 (图4b)，这是碳钢在含Cl^-介质中常见的腐蚀形态。

与双曲线型减薄区对称的上游管道内壁的微观

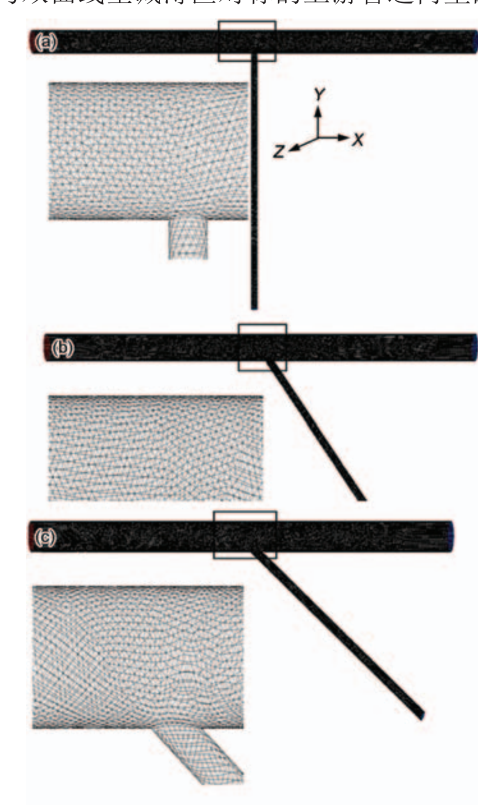


图2 3种不同结构的三通管件的网格示意图

Fig.2 Grids of three tee joints with different structures: (a) upright type tee, (b) 45° lateral tee, (c) 30° lateral tee

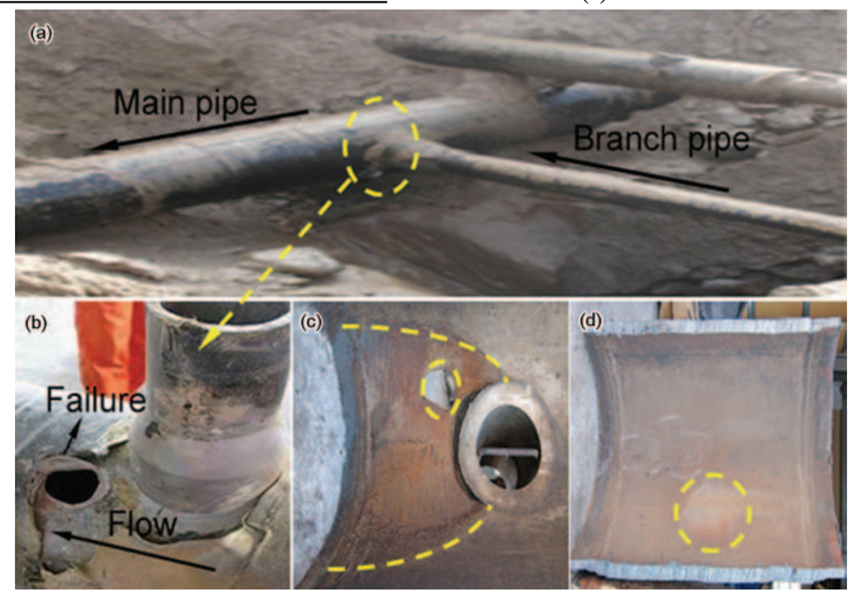


图3 爆管事故现场, 失效三通管件, 发生明显减薄的三通主管内壁及支管口正对位置处的主管内壁照片

Fig.3 Field inspection of tube explosion (a), the tee joint with failure (b), inner wall occurred thickness reduction of the tee joint (c) and inner wall directly faced by the mouth of branch pipe (d)

形貌如图5a所示，可以发现较多较大尺寸的点蚀

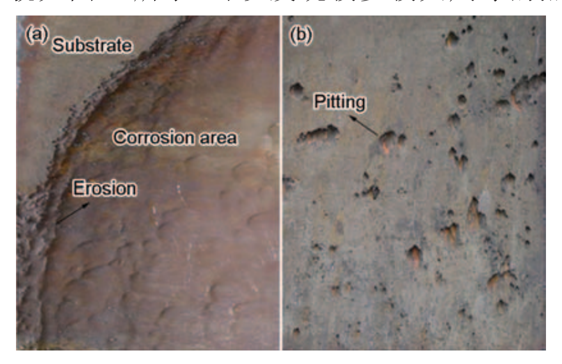


图4 失效三通的宏观形貌

Fig.4 Macro morphologies of the failure tee: the hyperbolic-type thinned area (a), inner wall of the tee upstream (b)

坑，且随着点蚀不断扩展，点蚀坑相互融合。双曲线型减薄区域内的管道呈现沟壑状的形貌特征 (图5b)，并且表面呈现河流状的冲刷痕迹 (图5c)。此外，流体冲刷区域也存在点蚀坑 (图5c，d)。

3.1.3 失效三通主管的减薄规律　管壁最薄处 (爆破处) 厚度仅为1.68 mm，距离三通角焊缝100 mm，距离支管轴线约175 mm。主管内壁双曲线形减薄区长约400 mm，其他位置未见明显减薄。图1中线段AA′，BB′，CC′，DD′，EE′对应位置的主管壁厚如图6a所示。根据三通主管设计壁厚 (26 mm)，计算出三通投入使用40个月以来，图1中各线段对应位置处主管壁厚的减薄速度，如图6b所示。由图6可以看出，随着测点位置远离三通角焊缝，主管的

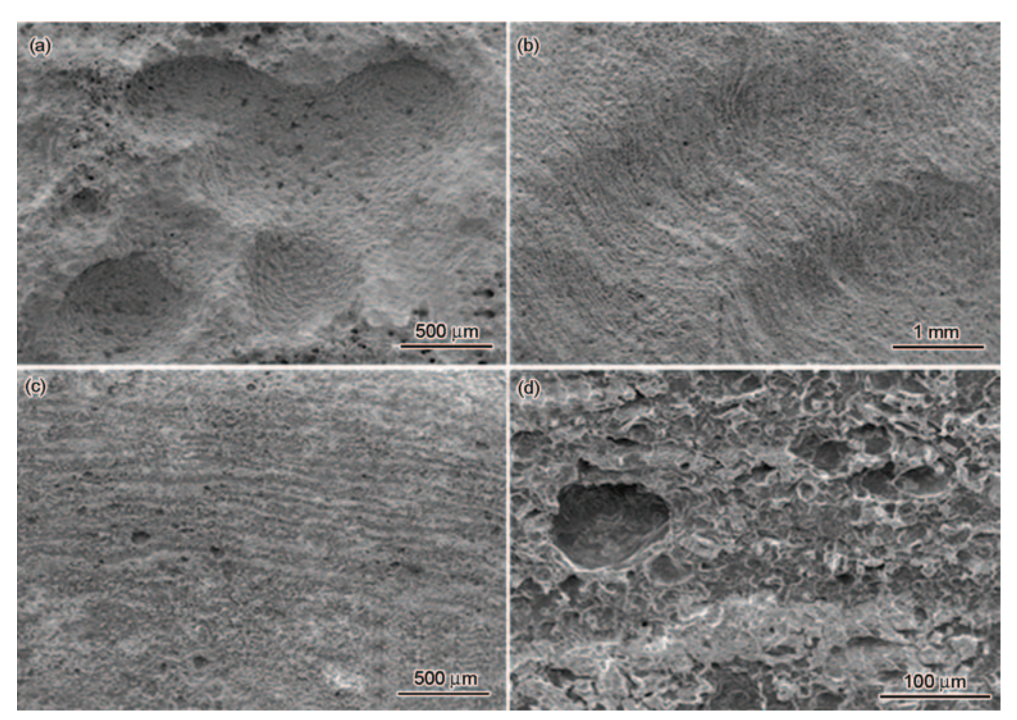


图5 失效三通的微观形貌

Fig.5 Micro morphologies of the failure tee:inner wall of the tee upstream (a), the hyperbolic-type thinned area with gully (b), wash zone (c) and pitting (d)

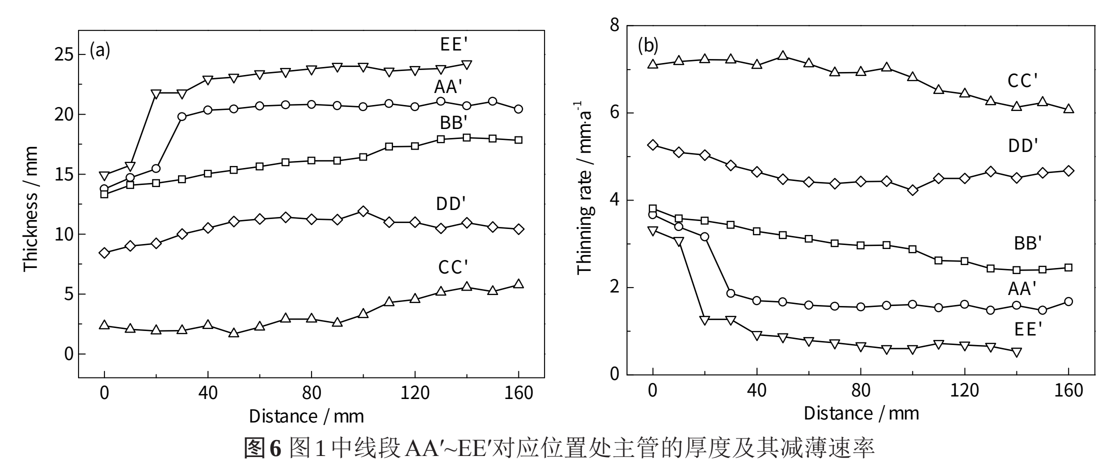


图6 图1中线段AA′~EE′对应位置处主管的厚度及其减薄速率

Fig.6 Thickness (a) and thinning rate (b) of the main pipe corresponding to the position of AA′~EE′ in Fig.1

减薄量逐渐减小，减薄速度也逐渐减小。

3.2 电偶腐蚀模拟结果

16Mn钢和316L不锈钢的开路电位如图7所示，16Mn钢的电位较负，316L不锈钢的电位较正，二者连接时会形成电偶，发生电偶腐蚀。其中，16Mn钢为阳极，316L不锈钢为阴极。根据法拉第定律，腐蚀电流密度与腐蚀速率存在如下关系[4]：

$$CR = K_1 I E_w / \rho \tag{1}$$

式中，K_1的值为3.27×10^{-3}[5]，mm·g/ (μA·cm·a)；I为电流密度，μA/cm²；ρ为密度，g/cm³。

根据公式 (1)，将不同电偶的电偶腐蚀电流密度转换为腐蚀速率，其结果如表2所示。由表2可知，随着16Mn钢和316L不锈钢正对面距离增大，电偶腐蚀速率逐渐减小。相应地，16Mn钢因电偶腐蚀造成的减薄量和减薄速率随电偶正对面距离增大而逐渐减小。

3.3 流态模拟结果

图8为直插式三通内部流体对管道壁面的剪切力云图，由图可见，流体对位于三通角焊缝7至11点钟方向的下游主管的壁面剪切力较大，且该区域大致呈双曲线型扩展。其中，沿着三通角焊缝8点钟和10点钟方向，即下游主管5点钟和7点钟方向的管壁所受剪切力最大。

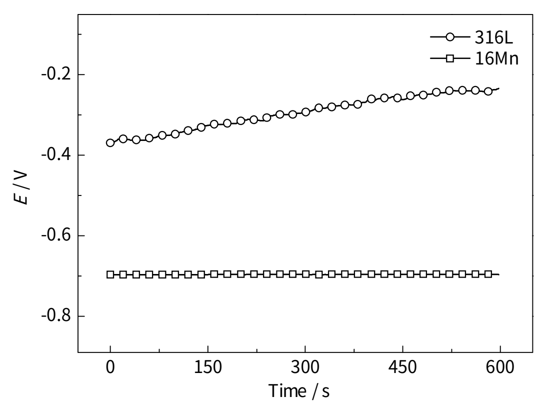


图7 16Mn钢和316L不锈钢的开路电位

Fig.7 Open circuit potential of 16Mn steel and 316L stainless steel

表2 电偶间距离不同时腐蚀稳定阶段的腐蚀电流密度平均值和电偶腐蚀速率

Table 2 Average of the current density at stable period and the corrosion rate while galvanic couple are at different distances

Distance of galvanic couple / cm	Current density μA·cm^{-2}	Corrosion rate mm·a^{-1}
0	79.09	0.9254
10	80.92	0.9468
20	44.42	0.5197
30	38.51	0.4506

图9a为直插式三通Z=0 mm截面流体的速度云图，可以看出，当支管与主管内两股高速流体汇合后，在靠近支管的下游主管壁面形成低速涡流区。由三通X=−80 mm截面 (图9b)、X=−200 mm截面 (图9c) 及X=−400 mm截面 (图9d) 流体的速度云图知，涡流区影响范围以主管6点钟方向 (三通角焊缝9点钟方向) 为中心，包涵5至7点钟方向 (三通角焊缝8至10点钟方向) 的主管壁面，低速涡流区长约500 mm。随着X绝对值的增大，下游母管壁面的涡流影响区呈先增后减的变化趋势，三通X=−200 mm截面为涡流中心区。

由直插式三通Z=0 mm截面流体的湍流强度云图 (图10a) 可知，靠近支管的下游主管壁面处流体的湍流强度较大。由三通X=−80mm截面 (图10b)、X=−200 mm截面 (图10c) 及X=−400 mm截面 (图10d) 流体的湍流强度云图可知，流体的湍流强度分布与速度分布存在关联性，涡流中心区流体的湍流强度最大，湍流对5至7点钟方向的主管壁面影响显著，这与涡流影响区域一致。

图11a为直插式三通Z=0 mm截面流体的温度云

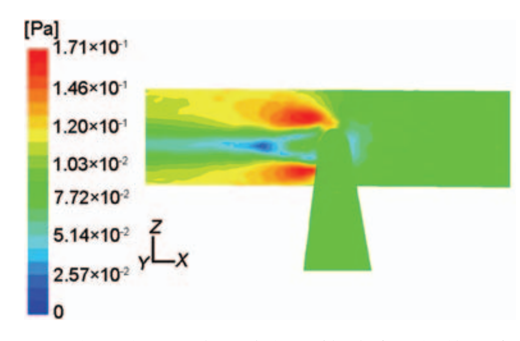


图8 直插式三通内部流体对管道壁面的剪切力云图

Fig.8 Contours of wall shear stress of the upright type tee joint

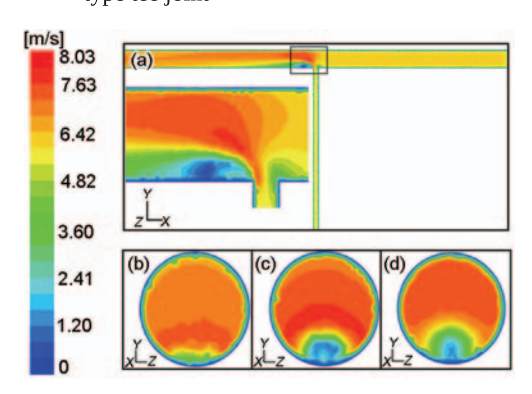


图9 直插式三通内部流体在Z=0，X分别为−80，−200和−400 mm截面上的速度云图

Fig.9 Contours of velocity magnitude on sections of Z=0 (a), X=−80 mm (b), X=−200 mm (c), X=−400 mm (d) of the upright type tee

图，可以看出，靠近支管的下游主管存在高温影响区域。观察三通 X=−80 mm 截面(图11b)、X=−200 mm 截面 (图11c) 及 X=−400 mm 截面 (图11d) 流体的温度云图可知，高温影响区与涡流影响区具有相关性，位于主管5至7点钟方向的流体的温度梯度变化剧烈。

如果将三通的汇入角改变为45°，此时三通内的壁面剪切力与直插式三通相比会发生很大的变化(图12a)。流体对管道的壁面剪切力显著减小，剪切作用较强的区域面积明显缩小。如果继续减小汇入角至为30°，此时流体对管道剪切作用较强的区域面积将会继续减小，剪切作用继续减弱 (图12b)。

45°三通不同截面上流体的速度云图如图13所示，可以看出，三通内两股高速流体汇合后，靠近支管的下游主管壁面流体的低速涡流强度显著减弱，涡流区影响范围明显减小。30°三通不同截面上流体的速度云图如图14所示，可以看出，三通内两股高速流体汇合后，低速涡流现象消失。

图15和16分别为45°三通和30°三通不同截面流体的湍流强度云图，可以看出管道内流体的湍流强度基本保持一致，靠近支管的下游主管壁面并未出现湍流强度较大的区域。

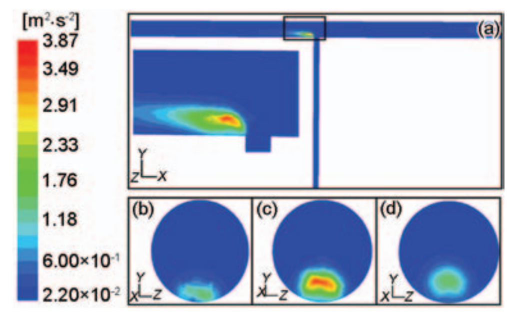


图10 直插式三通内部流体在 Z=0, X分别为−80, −200和−400 mm截面上的湍流强度云图

Fig.10 Contours of turbulent kinetic energy on sections ctions of Z=0 (a), X=−80 mm (b), X=−200 mm (c), X=−400 mm (d) of the upright type tee

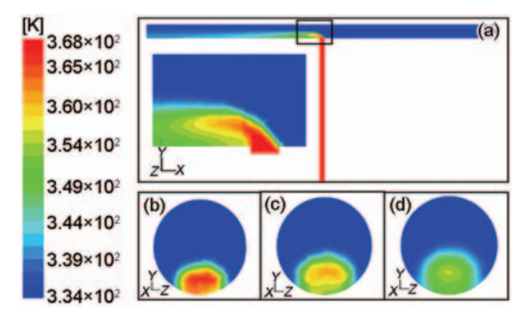


图11 直插式三通内部流体在 Z=0, X分别为−80, −200和−400 mm截面上的温度云图

Fig.11 Contours of static temperature on sections of Z=0 (a), X=−80 mm (b), X=−200 mm (c), X=−400 mm (d) of the upright type tee

4 讨论

失效三通主管材质为16Mn钢，支管材质为316L不锈钢，由于16Mn钢和316L不锈钢的自腐蚀电位不相等，所以三通选材设计中存在电偶腐蚀的风险[6,7]。直插式三通流态模拟结果显示，支管与主管内两股高速流体汇合后，在下游主管5至7点钟方向形成长约500 mm的流速下降、温度降低的涡流区。首先，由于湍流的出现和流速的下降，水汽颗粒

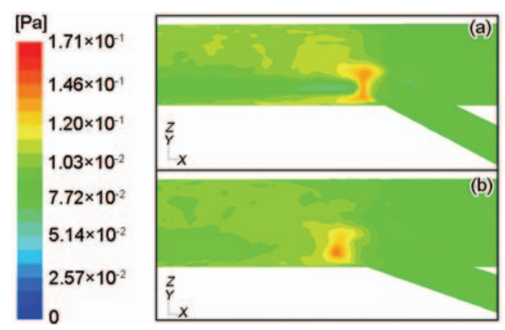


图12 45°三通和30°三通内部流体对管道壁面的剪切力云图

Fig.12 Contours of wall shear stress of the 45° lateral tee (a) and 30° lateral tee (b)

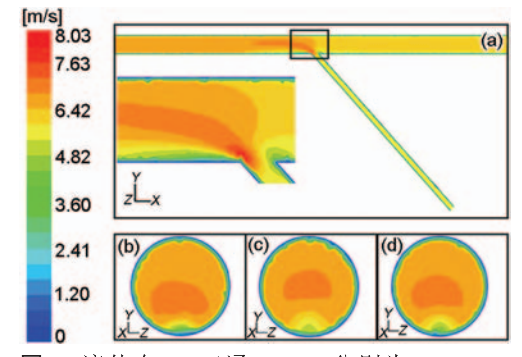


图13 流体在45°三通 Z=0, X分别为−80, −200和−400 mm截面上的速度云图

Fig.13 Contours of velocity magnitude on sections of Z=0 (a), X=−80 mm (b), X=−200 mm (c), X=−400 mm (d) of 45° lateral tee

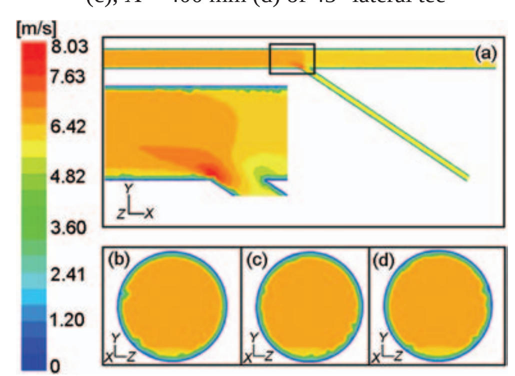
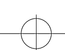


图14 流体在30°三通 Z=0, X分别为−80, −200和−400 mm截面上的速度云图

Fig.14 Contours of velocity magnitude on sections of Z=0 (a), X=−80 mm (b), X=−200 mm (c), X=−400 mm (d) of 30° lateral tee



之间碰撞的概率突然增大，会聚集成更大的水滴而凝结；其次，相对于支管，天然气进入集输管线以后温度降低，天然气中水蒸气的饱和蒸汽压也随之降低，导致水汽更加容易凝结；最后，湍流使酸性溶液在该区域长时间停留，与该区域管壁作用足够长的时间。在这些因素的共同作用下，水汽凝结之后粘附聚集于管道内壁面，同时CO_2等腐蚀性气体大量溶入凝结水中，从而形成典型的酸性腐蚀环境，为16Mn钢和316L不锈钢发生电偶腐蚀提供了必要的条件。

另外，同集输管线另一侧的环境相比，低速涡流区的温度相对较高，较高的温度与酸性介质联合作用，更易加速酸性腐蚀。现场观测到主管的减薄区长约400 mm，减薄区位于三通角焊缝7至11点钟方向，即下游主管5至7点钟方向，这与流态模拟结果吻合较好。而实验室内的电偶腐蚀模拟测试结果也表明，16Mn钢的减薄速率随着电偶正对面距离的增加而减小，这同样与现场观测到的主管的减薄规律一致。综上结果表明，电偶腐蚀是三通主管减薄失效的一个不可忽视的原因之一。

但是比较现场观测和电偶腐蚀测试结果，会发现二者之间存在着较大的出入。失效三通主管减薄

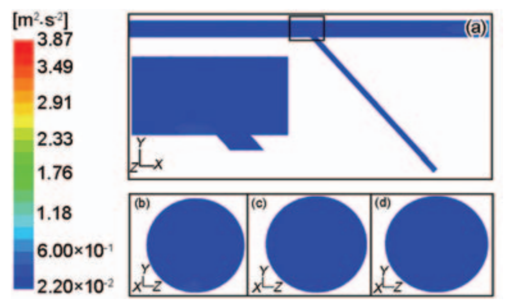


图15 流体在45°三通 Z=0, X分别为−80, −200和−400 mm截面上的湍流强度云图

Fig.15 Contours of turbulent kinetic energy on sections of Z=0 (a), X=−80 mm (b), X=−200 mm (c), X=−400 mm (d) of 45° lateral tee

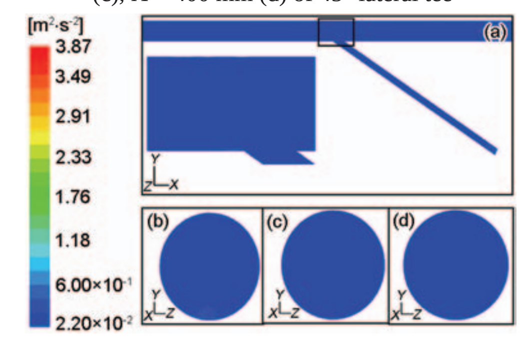


图16 流体在30°三通 Z=0, X分别为−80, −200和−400 mm截面上的湍流强度云图

Fig.16 Contours of turbulent kinetic energy on sections of Z=0 (a), X=−80 mm (b), X=−200 mm (c), X=−400 mm (d) of 30° lateral tee

速率大于16Mn钢的腐蚀速率，如图17所示，这说明导致三通的失效还另有原因。根据三通内流体的壁面剪切力云图可知 (图8)，支管与主管内两股高速流体在三通汇合后，对双曲线区域内的主管壁面产生强的剪切作用。在高速流体的连续切削作用下，双曲线区域内的主管会因机械冲刷而减薄，双曲线区域与现场观测到的失效三通主管的减薄区域吻合较好。双曲线区域内管道的微观形貌同样说明了机械冲刷的存在。腐蚀导致管壁表面凹陷和粗糙，从而导致流态发生更大的变化；流态发生变化之后，致使水汽更加容易凝结，气流的壁面剪切力导致腐蚀产物被吹走，使得腐蚀产物无法阻挡腐蚀，新鲜金属再次露出致使腐蚀加速发生。对比三通主管的上、下游内壁面，可以发现双曲线区域内管道的沟壑状的微观形貌正是局部腐蚀凹坑经过流体长时间冲刷后形成的。另外，酸性溶液会因重力作用而聚集于下游主管7点钟方向，即三通角焊缝8点钟方向，这就导致三通 X=−200 mm截面7点钟方向的主管壁面受到的冲刷和腐蚀最严重，从而发生严重的减薄现象，最终穿孔失效。现场观测结果有力地证实了这一分析，三通爆管位置位于主管下游，沿着三通角焊缝8点钟方向，即主管7点钟方向，距离支管轴线175 mm。电偶腐蚀和流体冲刷的协同作用是导致三通失效的根本原因。

比较直插式三通、45°三通和30°三通内部流体的流态模拟结果，可以看出直插式的三通结构导致支管与主管内两股高速流体汇合后流态发生剧烈变化，在靠近支管的下游主管壁面形成低速涡流区，且该区域流体的湍流强度及对管道的壁面剪切力较大，最终导致三通发生电偶腐蚀和机械冲刷。随着

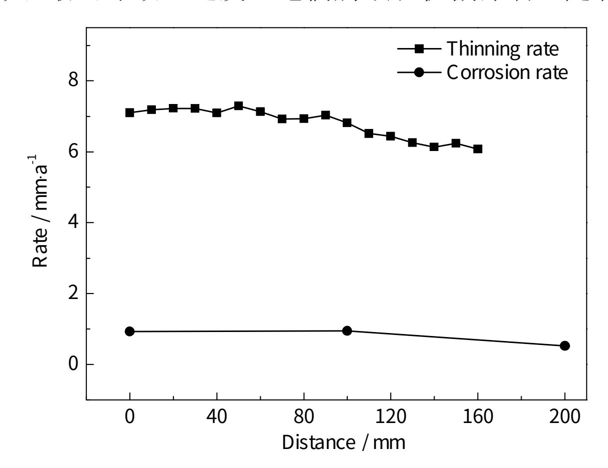


图17 图1中线段CC′对应位置处的主管的减薄速率和16Mn钢的腐蚀速率

Fig.17 Thinning rate of the main pipe corresponding to the position of CC′ in Fig.1 and corrosion rate of 16Mn steel

支管与主管入口方向夹角逐渐减小，低速涡流现象消失，流体对管道的壁面剪切力逐渐减小，三通的电偶腐蚀-冲刷的协同作用可以得到有效控制。

5 结论和建议

(1) 失效三通选材设计中存在电偶，并且其直插式结构导致支管与主管内两股高速流体汇合后流态发生剧烈变化，这为三通管道发生电偶腐蚀和机械冲刷提供了条件。

(2) 失效三通主管的减薄区为管道内流体的低速涡流区，天然气伴生气体CO_2和水分在该区域粘附，形成酸性腐蚀溶液，使得16Mn钢和316L不锈钢发生电偶腐蚀，最终导致16Mn钢减薄。

(3) 爆管处流体对管道内壁面的剪切力、流体湍流强度最大。使得该区域管道内壁面受到强的循环冲刷作用。此外，涡流形成的酸性溶液因重力作用在爆管处聚集，使得该区域管道的酸性腐蚀最为严重，最终导致爆管处管道的减薄量最大。

(4) 在电偶腐蚀和流体冲刷的协同作用下，最终在下游主管7点钟方向，即三通角焊缝8点钟方向，距离支管轴线175 mm处发生爆管事故。

(5) 为消除电偶腐蚀，在三通支管与主管选材时应尽量避免使用异种金属，或者在三通内壁涂覆涂层来避免电解质溶液与金属的直接接触。同时，可以通过减小支管与主管入口方向的夹角来优化三通的结构设计，从而避免流体在管道内部形成低速涡流区并有效地削弱流体对管道的冲刷作用。

参考文献

[1] 袁赓. 油气管道的腐蚀及预测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011

[2] 于勇. FLUENT入门与进阶教程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 24

[3] Majid Z A, Mohsin R, Yaacob Z. Failure analysis of natural gas pipes [J]. Eng. Failure Anal., 2010, 17(4): 818

[4] 杨列太. 腐蚀监测技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 51

[5] ASTM G102, Annual Book of ASTM Standards -Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements [R]. West Conshohocken ASTM

[6] 李晓刚. 材料腐蚀与防护 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009: 69

[7] 王朝辉, 于佰俭, 耿广辉. 管道防腐设计中电偶效应不容忽视 [J]. 腐蚀与防护, 2001, 8(1): 33